

О расчетах болтового соединения на смятие отверстий в пластине из слоистого полимерного композиционного материала

К.Н. Рудаков • Ю.Н. Дифучин

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 03 April 2018 / Accepted: 11 September 2018

Аннотация. Ранее авторами было создано 24 3D-модели образцов односрезного двурядного болтового соединения с ПКМ (контактная задача), в которых варьировались структуры ПКМ (6 вариантов), а также боковой зазор болтов с отверстиями (4 значения). Неизменными были величина силы стягивания пакета и сила, растягивающая образец. По результатам расчетов определены, в частности, распределения контактных давлений на поверхностях отверстий, а также напряжений в пластине из ПКМ у отверстий (таблицы, графики).

В статье на основе указанных данных и дополнительных расчетов получили следующие результаты:

- для проведения статического расчета болтового соединения на смятие ввели поправочную функцию, параметрами которой являются характеристики структуры ПКМ и коэффициент изгиба;
- уточненный вид поправочной функции необходимо получить в дополнительных исследованиях (натурных или численных), что позволит создать базу данных для величин этой функции для актуальных в отрасли вариантов силовых болтовых соединений с композитами.

Ключевые слова: численное 3D моделирование; ПКМ; болтовое соединение; прочность; МКЭ.

Введение

Основным крепежным элементом в разъемном механическом соединении для деталей из композиционных материалов (КМ) в силовых конструкциях, в частности, авиационных, является болт. Болтовым соединением (БС) называют и соединения с заклепками. Расчет БС на прочность и (или) усталость предполагает проведение статического расчета характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов соединения [1]. При этом классические формульные подходы, в том числе и критериальные, разработанные для металлов, не дают достаточной точности, требуют модификации [2-4]. Были проведены многочисленные натурные эксперименты по выявлению влияния различных конструктивно-технологических факторов на прочность БС с КМ. Их краткий обзор проведен, например, в [2-4]. Однако натурный эксперимент не позволяет "заглянуть внутрь материала". Для этого можно использовать метод конечных элементов (МКЭ).

МКЭ позволяет уточнять расчетные модели. А именно: переходить к контактными моделям с послойным моделированием КМ в зонах отверстий, с учетом трения, возможных зазоров при постановке болтов в отверстия, усилия свинчивания болтового соединения, температурных деформаций, расслоений, отколов и других допускаемых технологических дефектов [5-8].

В результате проведения уточненных расчетов, в том числе авторами статьи, были выявлены некоторые особенности, большинство из которых невозможны в БС деталей из однородных материалов (металлов) и которые проясняют суть многих явлений, характерных для БС с КМ.

Одним из обязательных расчетов БС на прочность является расчет боковой поверхности отверстия на смятие. Характерной особенностью многих КМ, в частности, слоистых полимерных КМ с углеродной нитью (ПКМ), является весьма низкая вязкость, т.е. хрупкость. Их разрушение от воздействия контактных усилий (смятие) тоже носит хрупкий характер: материал крошится. Поэтому возрастают требования к применяемым критериям прочности на смятие хрупких КМ в БС: и к точности определения напряженного состояния в отверстиях, и к обоснованности допускаемых напряжений. В условиях увеличения применения БС с КМ в силовых конструкциях эта проблема становится все более актуальной.

Цель работы: на основе выявления тенденций во влиянии некоторых технологических параметров БС на характеристики НДС в слоистом ПКМ в зонах отверстий обосновать поправочную функцию в классическом (инженерном) методе расчета БС на смятие.

Модели

Односрезное БС по сравнению с двусрезным БС гораздо отчетливее выявляет особенности НДС в болте и окрестности отверстий в композите [9]. Поэтому рассматривали односрезное БС, вернее – образец для испытания на усталость односрезного двухрядного БС (рис.1) с полимерным композиционным материалом (ПКМ).

Полные данные по образцу и материалам помещены в таблицах статьи [10]: в табл.1 – размеры; в табл.2 – упругие характеристики металлов (алюминиевого сплава Д16АТ – швеллера и шайбы, титанового сплава ВТ-16 – болтов); в табл.3 – слоев ПКМ (углеродистой ленты УОЛ-300-1А и углеродистой ткани УТ-900-3А со связующим ЭДТ-69н, упругие характеристики которых взяты из [11]). Направления: 1 – продольное, 2 – поперечное, 3 – соответствует правой системе координат.

Полосы ПКМ скомпонованы из 24-х слоев. Слои из УОЛ-300-1А номинальной толщиной 0.235 мм в ПКМ уложены под углами 0 и 90 градусов относительно продольной оси полосы X , а из УТ-900-3А номинальной толщиной 0.220 мм – под ± 45 градусов. Моделировали шесть структур: базовую ПКМ-0 (реальную), и еще пять – модельных (табл.4 в [10]). Значения "эффективных модулей" ПКМ, определенные по результатам численных экспериментов, помещены в таблицу 5 в [10]. Численные эксперименты соответствовали требованиям стандарта для натуральных экспериментов [12]. Некоторые результаты расчетов образца БС представлены в [13...16]. Наиболее контрастными по результатам оказались две структуры: ПКМ-0 со структурой $[(-45/0/45/90)_3]_S$ и ПКМ-III также с симметричной структурой $[-45/45/90/-45/45/90/45/0/-45/0/90/0]_S$. Здесь будем использовать лишь результаты, непосредственно связанные с расчетом материала отверстий БС на смятие.

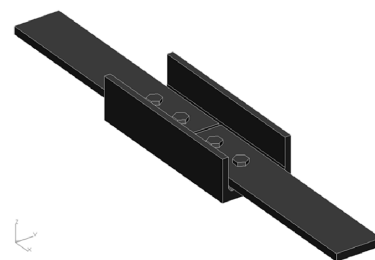


Рис. 1. Полная геометрическая модель образца для испытаний на усталость односрезного болтового соединения с ПКМ

Инженерный вариант расчета композита на смятие

Расчет на смятие контактной поверхности отверстий в пластине из ПКМ можно проводить по классической формуле [2], в которую дополнительно введена функция влияния нескольких параметров:

$$\frac{N_i}{h_i d_i} \cdot F(q_1, q_2, \dots) \leq [\sigma]_{CM}; \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где N_i – суммарное усилие, воспринимаемое i -м отверстием (болтом); h_i – толщина пластины у i -го отверстия; d_i – номинальный диаметр i -го отверстия; $F(q_1, q_2, \dots)$ – функция, учитывающая влияние параметров БС: исходной величины зазора δ_i (на диаметр) между боковыми поверхностями i -го болта и отверстия в пластине из ПКМ, структуры слоистого ПКМ, изгиба и т.д.; $[\sigma]_{CM}$ – справочное допускаемое напряжение на смятие наиболее нагруженного слоя материала пластины из ПКМ.

Нахождение усилий, воспринимаемых поверхностями отверстий

В [13] получили, что примерно (20-30)% усилия, приложенного к образцу, воспринималась силой трения между поверхностями пластины из ПКМ и швеллера и не передавалась через контакты в отверстиях. В связи с этим можно ввести коэффициент $\chi < 1$, определяющий ту часть от силы N_X , что воспринимается болтами, тогда $N_1 + N_2 = \chi N_X$. Еще в [13] получили, что отношения средних (в "перерезываемых" сечениях болтов) касательных напряжений имеют слабую зависимость от зазоров и структуры. Силы, воспринимаемые болтами (и отверстиями), можно подсчитать по формуле

$$N_i = (\tau_{XZ})_m \cdot A_i; \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где $A_i = \pi d_i^2 / 4$ – площади поперечных сечений каждого болта. Обозначим, что $N_1 / N_2 = k$. Теперь силы, которые воспринимали отверстия, можно выразить и такими формулами

$$N_1 = \omega \chi N_X; \quad N_2 = (1 - \omega) \chi N_X, \quad (3)$$

где коэффициент $\omega = k / (1 + k)$. Часть данных из таблицы 2 [13] поместили в соответствующую часть таблицы 1, туда же поместили значения ω для разных структур и зазоров, а также среднее для всех вариантов зазоров и структур значение ω_m .

Среднеквадратичное отклонение величин ω от среднего ω_m составило не более 3.2%, поэтому в (3) вместо значения ω можно использовать среднее значение ω_m .

Умножили значения $((\tau_{XZ})_m)_i$ таблицы 1 на площадь поперечного сечения болта $A \approx 19.635 \text{ мм}^2$, получили значения N_i . Так как задавали $N_X = 10 \text{ КН}$, то можно подсчитать значения $\chi = (N_1 + N_2) / N_X$.

Результаты поместили в табл.2. Естественно, что величины $\omega = N_1 / (\chi N_X) = 1 - N_2 / (\chi N_X)$, а также ω_m , будут такими же, как в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения касательных напряжений $(\tau_{XZ})_m$ в сечениях болтов, величины k , ω и ω_m

Вариант структуры	$(\tau_{XZ})_m$, МПа								$k = ((\tau_{XZ})_m)_1 / ((\tau_{XZ})_m)_2$				ω				ω_m
	Зазор δ , мкм								Зазор δ , мкм				Зазор δ , мкм				
	Болт 1				Болт2												
	0	10	20	70	0	10	20	70	0	10	20	70	0	10	20	70	
ПКМ-0	202	210	217	224	180	174	183	186	1.12	1.21	1.18	1.20	0.528	0.548	0.541	0.545	0.540
ПКМ-I	199	202	202	212	176	167	170	185	1.14	1.21	1.19	1.15	0.533	0.548	0.544	0.535	
ПКМ-II	182	201	202	207	162	167	175	183	1.12	1.20	1.15	1.13	0.528	0.545	0.535	0.531	
ПКМ-III	185	202	201	215	169	169	169	182	1.09	1.20	1.19	1.18	0.521	0.545	0.544	0.541	
ПКМ-IV	182	199	200	211	164	167	169	187	1.11	1.20	1.18	1.13	0.526	0.545	0.541	0.531	
ПКМ-V	181	200	198	216	162	164	168	178	1.12	1.22	1.18	1.22	0.528	0.550	0.541	0.550	

Таблица 2

Значения усилий, создающих давления в отверстиях; величины χ

Вариант структуры	N_i , Н								$\chi = (N_1 + N_2) / N_X$			
	Зазор δ , мкм								Зазор δ , мкм			
	Отверстие 1				Отверстие 2				Зазор δ , мкм			
	0	10	20	70	0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	3966	4123	4261	4398	3534	3416	3593	3652	0.750	0.754	0.785	0.805
ПКМ-I	3907	3966	3966	4163	3456	3279	3338	3632	0.736	0.725	0.730	0.780
ПКМ-II	3574	3947	3966	4064	3181	3279	3436	3593	0.675	0.723	0.740	0.766
ПКМ-III	3632	3966	3947	4222	3318	3318	3318	3574	0.695	0.728	0.726	0.780
ПКМ-IV	3574	3907	3927	4143	3220	3279	3318	3672	0.679	0.719	0.725	0.781
ПКМ-V	3554	3927	3888	4241	3181	3220	3299	3495	0.673	0.715	0.719	0.774

Величины $(p)_i = N_i / (h_i d_i)$ в формуле (1) фактически являются приведенными (усредненными) значениями контактного давления в проекции профиля отверстия на площадку, перпендикулярную направлению действия силы.

Если бы материал пластины был изотропным, то именно $(p)_i$ сравнивали бы со значением $[\sigma]_{CM}$. Для пластин из композитного материала этого делать нельзя.

Восприятие слоями ПКМ контактного давления в отверстиях

Расчетами было получено [13], что распределение контактного давления в отверстии пластины из ПКМ весьма неравномерно – см. рис.2.

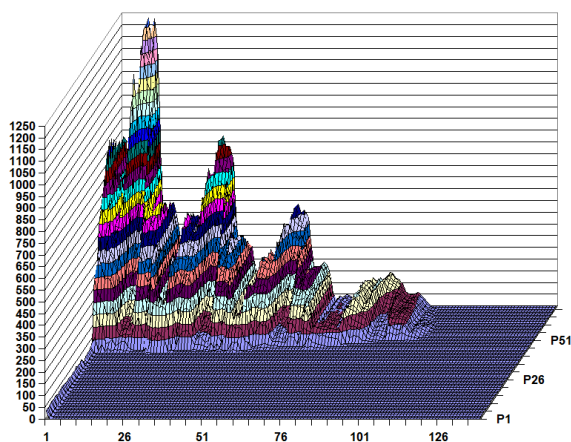


Рис. 2. График контактных давлений, МПа, на поверхности первого отверстия в образце болтового соединения с $\delta = 20$ мкм, ПКМ-0 [13]

Максимумы соответствуют слоям с укладкой вдоль действия силы N_i , т.е. с углом укладки 0° , а минимумы (но не нули) – поперечно расположенным слоям (с углом укладки 90°). Поскольку таких слоев – несколько, то и локальных максимумов и минимумов – несколько. Если болт будет иметь сопоставимую (со слоями КМ с углом укладки 0°) жесткость боковой поверхности, то именно эти слои в КМ должны сминаться в первую очередь.

Оценим долю от общего усилия N_i , воспринимаемую слоями с углом укладки 0° . Предположим, что эта доля равна доле в эффективном модуле Юнга, приходящейся на слой. Воспользуемся формулой Фойгта, которая применяется для подсчета эквивалентных упругих модулей однонаправленного композита и дает верхнюю оценку [18]:

$$E_{ef} = \left(\sum V_i h_i E_i \right) / h_\Sigma, \quad (4)$$

где V_i – весовая часть i -го слоя в однонаправленном

композите; E_i – модуль упругости; h_i – номинальная толщина слоя; h_Σ – суммарная толщина слоев. Для характерной подструктуры композита [45 / 0 / -45 / 90] формулу (4) перепишем как

$$(E_{11})_{ef} = [h_L(E_{11})_0 + h_L(E_{22})_{90} + \lambda 2h_T(E_{11})_{\pm 45}] / h_\Sigma, \quad (5)$$

где коэффициент приведения λ при известном значении $(E_{11})_{ef}$ позволяет (при необходимости) пересчитать вклад модулей упругости слоя, уложенного под углами $\pm 45^\circ$ к основному направлению. Из (5)

$$\lambda = \frac{h_\Sigma(E_{11})_{ef} - h_L((E_{11})_0 + (E_{22})_{90})}{2h_T(E_{11})_{\pm 45}}. \quad (6)$$

Из (5) имеем формулы для оценки относительных вкладов слоев с разными углами укладки в сопротивление деформированию в основном направлении:

$$\eta_0 = h_L((E_{11})_0) / (h_\Sigma(E_{11})_{ef}); \quad \eta_{90} = h_L((E_{22})_{90}) / (h_\Sigma(E_{11})_{ef}); \quad \eta_{\pm 45} = \lambda 2h_T(E_{11})_{\pm 45} / (h_\Sigma(E_{11})_{ef}). \quad (7)$$

Используя значения модулей из табл.3 и табл.6 [10], получим, что $\lambda \approx 0.5865$, и (в числах)

$$(E_{11})_{ef} = 38736 + 2066 + 22158 = (0.615252 + 0.032813 + 0.351935) \cdot 62960 = 62960.$$

Таким образом, имеем относительные вклады слоев с разными углами укладки в сопротивление деформированию в основном направлении: $\eta_0 = 38736 / 62960 \approx 0.6153$; $\eta_{90} \approx 0.0328$; $\eta_{\pm 45} \approx 0.3519$. Если бы слои одинаково сопротивлялись, то вклады всех были бы обратно пропорциональны количеству слоев, в данном случае подструктура имеет четыре слоя, поэтому введем соответствующий показатель $w = 1/4 = 0.25$. Разделив на w значения η_0 , η_{90} и $\eta_{\pm 45}$, получим, во сколько раз изменяется величина расчетного среднего давления $((p_X)_i)_m = N_i / (h_i d_i)$ при перерасчете на слой: в $\beta_0 = \eta_0 / w \approx 2.461$, $\beta_{90} = \eta_{90} / w \approx 0.1313$ и $\beta_{\pm 45} = \eta_{\pm 45} / w \approx 1.408$ раз.

Коэффициент β_0 не полностью, но в значительной степени и напрямую характеризует влияние структуры ПКМ на перераспределение контактных давлений, возникающих от силы N_i . Поскольку $\beta_0 > 1$, то на него необходимо умножить числитель формулы (1), т.е. теперь можно принять, что для наиболее нагруженного слоя параметр $q_1 = \beta_0$ и функция влияния

$$F(q_1, q_2, \dots) = \beta_0 \cdot f_q(q_2, q_3, \dots). \quad (8)$$

В таблицу 3 поместили величины давлений, подсчитанные из данных таблицы 2, по формуле (1) без функции влияния, а также умноженные на β_0 , т.е. при $f_q(q_2, q_3, \dots) = 1$ в формуле (8). Учли, что в образце $h_i d_i = 26.1 \text{ мм}^2$.

Таблица 3

Значения приведенных контактных давлений в отверстиях, МПа

Вариант структуры	$(p)_i = N_i / h_i d_i$								$(\tilde{p})_i = (p)_i \cdot \beta_0$							
	Зазор δ , мкм Отверстие 1				Зазор δ , мкм Отверстие 2				Зазор δ , мкм Отверстие 1				Зазор δ , мкм Отверстие 2			
	0	10	20	70	0	10	20	70	0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	152	158	163	169	135	131	138	140	374	389	402	415	333	322	339	344
ПКМ-I	150	152	152	159	132	126	128	139	368	374	374	393	326	309	315	343
ПКМ-II	137	151	152	156	122	126	132	138	337	372	374	383	300	309	324	339
ПКМ-III	139	152	151	162	127	127	127	137	343	374	372	398	313	313	313	337
ПКМ-IV	137	150	150	159	123	126	127	141	337	368	370	391	304	309	313	346
ПКМ-V	136	150	149	162	122	123	126	134	335	370	367	400	300	304	311	330

Если бы не было изгиба болтов, то значения $(\tilde{p})_i$, возможно, совпали бы с расчетными.

Максимальные уровни контактных напряжений

Изгиб болта формирует различные уровни контактных напряжений, воспринимаемых слоями с углом укладки 0° (см. рис.2). Из результатов расчета для структур ПКМ-0 и ПКМ-III составили таблицу значений этих напряжений (табл. 4). В ней как Z обозначили координату срединной плоскости слоя, отсчитанную от срединной плоскости пластины из ПКМ.

Причина появления ненулевого давления на верхнем выходе из первого отверстия ($Z = 2.284 \text{ мм}$) при зазоре $\delta = 0$ обсуждалась в статье [14]. Она не связана с изгибом болта, поэтому это (116 МПа) значение можно проигнорировать.

На основе данных таблицы 4 для этих двух структур подсчитали средние значения $(p_m)_i$ от максимальных значений контактных давлений p_{\max} в слоях с углом укладки 0° , усредненную изгибную составляющую $(p_u)_i$, а также коэффициенты изгиба $(k_u)_i$:

$$(p_m)_i = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 (p_{\max})_n; \quad (p_u)_i = 0.5(p_{\max} - p_{\min}); \quad (k_u)_i = (p_u)_i / (p_m)_i; \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

где в качестве p_{\max} и p_{\min} принимали максимальные и минимальные значения из столбцов таблицы 4.

Таблица 4

Максимальные значения контактных давлений в слоях с углом укладки 0° , МПа

Вариант структуры	Z, мм	Зазор δ , мкм. Отверстие 1				Зазор δ , мкм. Отверстие 2			
		0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	2.284	0	0	0	0	116	0	3	0
	1.414	0	0	0	0	93	51	55	0
	0.544	148	129	119	120	176	172	180	165
	-0.544	371	356	370	381	337	346	359	412
	-1.414	608	629	655	672	465	544	594	658
	-2.284	963	1053	1133	1148	777	867	962	1093
ПКМ-III	0.979	67	35	39	17	161	116	101	68
	0.544	117	105	106	117	151	155	148	158
	0.109	185	173	178	204	203	206	205	220
	-0.109	217	219	226	260	214	235	239	254
	-0.544	338	325	327	363	309	327	332	354
	-0.979	552	548	553	613	464	506	507	546

Результаты расчетов поместили в таблицу 5.

Таблица 5

Средние значения (от максимальных) контактных давлений в слоях с углом укладки 0° , МПа; коэффициенты изгиба

Вариант структуры	Характеристика	Отверстие 1. Зазор δ , мм				Отверстие 2. Зазор δ , мм			
		0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	p_m , МПа	348	361	380	387	308	330	359	388
	k_u	1.38	1.46	1.49	1.48	1.26	1.31	1.34	1.41
ПКМ-III	p_m , МПа	246	234	238	262	250	258	255	267
	k_u	0.99	1.10	1.08	1.14	0.61	0.76	0.80	0.90

Как и ожидалось, структура ПКМ-III имеет наименьший коэффициент изгиба. Кроме того, она имеет и меньшие уровни среднего давления на слои с углом укладки 0° . Это – результат смещения слоев с углом укладки 0° к срединной плоскости пластины.

Если теперь подсчитать пиковые значения контактных давлений по формуле

$$(p_{\max})_i = (p)_i(1 + k_u); \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

то получим величины, близкие к максимальным значениям контактных давлений таблицы 4, что следует из таблицы 6.

Таблица 6

Сравнительные данные максимальных контактных давлений в слоях с углом укладки 0°

Вариант структуры	Характеристика	Отверстие 1. Зазор δ , мм				Отверстие 2. Зазор δ , мм			
		0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	p_{\max} , МПа	890	957	1001	1029	753	744	793	829
	p_{\max} , МПа	963	1053	1133	1148	777	867	962	1093
	$\delta_{p_{\max}}$, %	7.6	9.1	11.7	10.4	3.1	14.2	17.6	24.2
ПКМ-III	p_{\max} , МПа	683	785	774	832	504	551	563	640
	p_{\max} , МПа	552	548	553	613	464	506	507	546
	$\delta_{p_{\max}}$, %	-23.7	-43.2	-40.0	-35.7	-8.6	-8.9	-11.0	-17.2

Множителем $(1 + k_u)$ фактически ввели еще один параметр функции влияния, т.е. $q_2 = k_u$ и получили ее в виде

$$F(q_1, q_2, \dots) = \beta_0 \cdot (1 + k_u) \cdot f_q(q_3, q_4, \dots). \quad (11)$$

Влияние величины бокового зазора

Данные таблицы 6 показали наличие неучтенного влияния бокового зазора на величины максимальных контактных давлений в слоях с углом укладки 0° , хотя частично это влияние было учтено при вычислении сил N_i , действующих на болт (отверстие).

Для получения выражения функции влияния величины δ рассмотрели такие обстоятельства.

1. Незначительность влияния бокового зазора. Судя по данным таблицы 5, за исключением случая нулевого зазора, можно с хорошей точностью пренебречь таким влиянием на величины коэффициента изгиба k_u . А нулевой зазор на практике не реализуется.

2. Хотя для разных структур получили разные величины коэффициента изгиба k_u , он не в полной мере соответствует требованиям к поправочным функциям, поскольку для разных структур и отверстий расчетные отклонения оказываются либо положительными, либо отрицательными;

3. Момент изгиба. Сила N_X создает относительно плоскости среза момент изгиба, равный $N_X h_\Sigma / 2$. Часть этого момента воспринимается контактными давлениями пятна контакта головки болта с пластиной из ПКМ, а остальная часть – контактными давлениями на боковых поверхностях отверстий в пластине из ПКМ. При изгибе балки из ПКМ величина $\sigma_{\max} = M z_{\max} / J_Y$, где M – изгибающий момент, приходящийся на сечение балки в актуальном сечении; z_{\max} – удаление слоя ПКМ, в котором реализуется σ_{\max} , от нейтрального слоя балки; $(J_Y)_i$ – момент инерции сечения, воспринимающего изгиб, относительно оси Y . Если принять, что и в пластине формула дает достаточно точное решение, а при смене структуры ПКМ величины M не меняются, то влияние структуры на σ_{\max} можно отразить отношением этих напряжений для разных структур. Например, $\gamma = (\sigma_{\max})_{ПКМ-III} / (\sigma_{\max})_{ПКМ-0} = (z_{\max} / J_Y)_{ПКМ-III} / (z_{\max} / J_Y)_{ПКМ-0}$. Так как ширина пластины в обоих случаях одинакова, то $\gamma = ((z_{\max})_{ПКМ-0} / (z_{\max})_{ПКМ-III})^2$. Но подстановка из таблицы 4 значений z_{\max} дает чрезмерно большие величины γ . Т.е. простейшая функция влияния γ может иметь вид $f_\gamma = 1 + \alpha \cdot \gamma$, где необходимо иметь алгоритм определения коэффициента $0 < \alpha < 1$.

4. Площади контакта в отверстиях. Как показали расчеты болтовых соединений в трехмерной контактной постановке, болт, передавая нагрузку через односрезное БС, S-образно изгибается. И всегда в односрезном болтовом соединении изгибается полоса из ПКМ и появляется боковой клиновидный зазор между боковой поверхностью болта и поверхностью отверстия [13-15, 17] (рис.13 в [13], рис.4 и 14 в [14], рис.2 в [15], рис.11 в [17]). Это приводит к уменьшению площади реальной контактной поверхности. С увеличением зазора болт-отверстие эта площадь становится все меньше [13, 14].

В [13, 14] приведены расчетные данные о величинах $\Delta_C = A_C / A$, т.е. об отношениях площадей боковых поверхностей отверстий, нагруженных контактным давлением, к полной площади боковой поверхности отверстия. Эти данные аппроксимировали единой для всех структур ниспадающей экспоненциальной функцией от величины зазора на диаметр δ (рис.6 [13]). Влияние зазора существенное. Но в [13, 14] A – общая площадь боковой поверхности отверстия, а при рассмотрении вопроса о смятии материала поверхности нужна только половина, с контактными давлениями. Поэтому полученные в [13] значения нужно увеличить в два раза. Итак, можно ввести функцию влияния величины зазора

$$f_\delta(\delta_i) = \mu + \nu \exp(-\chi \delta_i); \quad f_\delta(0) = (\mu + \nu) < 1. \quad (12)$$

Полученные в [13] значения μ и ν увеличили в два раза, получили для функции (12) $\mu = 0.227$, $\nu = 0.70$, $\chi = 0.025$ при зазоре δ_i (на диаметр), выраженном в микрометрах. Значение $f_\delta(0) < 1$ поясняется тем, что часть силовой нагрузки воспринимается БС за счет трения между его элементами. Если же трение будет отсутствовать (или же "сниматься" вибрацией), то должно быть $f_\delta(0) \approx 1$, что проверено расчетом [13]. Уменьшение значения функции $f_\delta(\delta)$ с увеличением величины зазора δ вызывается увеличением изгиба болта.

Однако ввести (12) в корректирующую функцию $F(q_1, q_2, q_3, \dots) = \beta_0 \cdot (1 + k_u) \cdot f_\delta(\delta_i) \cdot f_q(q_4, q_5, \dots)$ невозможно, поскольку, как это следует из данных таблицы 4 и рис.6 из [13], влияние изменения Δ_C на

пиковые величины контактных давления не столь значительно, к тому же оно частично учтено формулами (2) и (3). Поэтому для приближенных расчетов можно принять $f_q(q_3, q_4, \dots) \approx 1$ и

$$F(q_1, q_2, \dots) \approx \beta_0 \cdot (1 + k_u). \quad (13)$$

Варианты проведения расчета болтового соединения с ПКМ на смятие

Проведенный выше анализ позволяет предложить два варианта алгоритма проверочных расчетов на контактную прочность (смятие отверстия) болтового соединения со слоистым композитом.

Вариант 1 – уточненная оценка:

1. проведение конечно-элементного моделирования характерного участка болтового соединения, с максимально возможным сгущением сетки КЭ в зоне отверстий и моделированием каждого слоя композита минимум тремя КЭ по толщине (иначе пиковые значения будут полностью срезаны при отображении результатов). Для уменьшения размера порождаемой системы уравнений можно применять смешанную модель композита, обоснованную в статье [19]. Задачу формулировать как контактную, с учетом трения, а также с учетом зазоров и других конструктивно-технологических факторов [10];

2. проведение расчетов модели (достаточно персональной ЭВМ с увеличенным размером оперативной памяти);

3. получение из результатов расчетов пиковых значений контактных давлений $(p_{\max})_i$ в отверстиях и сравнение их с напряжением, допускаемым на смятие для материала данного слоя: $(p_{\max})_i \leq [\sigma]_{CM}$, что по смыслу соответствует классической инженерной формуле $N_i / (h_i d_i) \leq [\sigma]_{CM}$; $i = 1, 2$.

Вариант 2 – экспресс-оценка:

1. проведение (каким-либо методом, в частности, единичным расчетом как в варианте 1 с дальнейшим применением формул (2) и (3)) оценки величины усилия, приходящегося на i -е отверстие болтового соединения;

2. подсчет величины приведенного давления в отверстии $(p_m)_i = N_i / (h_i d_i)$, фигурирующего в левой части инженерной формулы $N_i / (h_i d_i) \leq [\sigma]_{CM}$;

3. подсчет величины "эффективного" модуля упругости $(E_{11})_{ef}$ ПКМ;

4. оценка вклада слоя ПКМ, уложенного под углом 0° к основному направлению действия нагрузки, т.е. величины η_0 , используя первую формулу (7) или другую с аналогичным назначением. Подсчет по формуле $(p_m)_i = (p_m)_i \cdot \eta_0 / w$ величины приведенного давления, приходящегося на слои с углом укладки 0° ;

5. оценка коэффициента изгиба k_u в пластине проведением единичного уточненного расчета (как в варианте 1) или каким-либо иным способом;

6. подсчет максимального значения контактного давления в отверстии, по формуле (10), т.е. $(p_{\max})_i = (p_m)_i \cdot (1 + k_u)$, $i = 1, 2$ и сравнение их с напряжением, допускаемым на смятие для материала данного слоя: $(p_{\max})_i \leq [\sigma]_{CM}$.

Выводы

Результаты анализа расчетных данных позволили сделать следующие общие выводы:

1. уточненные проверочные расчеты БС с пластинами из слоистого ПКМ на контактную прочность (смятие отверстия) невозможны без применения численных моделей с применением МКЭ и в контактной постановке. Предложен соответствующий вариант алгоритма проведения расчетов;
2. в качестве приближенной (экспресс) оценки БС с пластинами из слоистого ПКМ на контактную прочность (смятие отверстия) можно использовать формулу (1) с поправочной функцией (13). Предложен соответствующий вариант алгоритма проведения расчетов;
3. для достаточно полного обоснования в формуле (1) поправочной функции $F(q_1, q_2, \dots)$ необходимо проводить дополнительные исследования – натурные и численные.

Про розрахунки болтового з'єднання на зминання отворів у пластині зі шаруватого полімерного композиційного матеріалу

К.М. Рудаков, Ю.М. Дифучин

Анотація. Раніше авторами було створено 24 3D-моделі зразків однорізного дворядного болтового з'єднання із ПКМ (контактна задача), у яких варіювалися структури ПКМ (6 варіантів), а також бічний зазор болтів з отворами (4 значення). Незмінними були величина сили стягування пакета й сила, що розтягує зразок. За результатами розрахунків визначені розподіли напружень і підраховані коефіцієнти концентрації напружень у пластинах із ПКМ у отворів (таблиці, графіки).

У статті на основі зазначених даних і додаткових розрахунків отримали наступні результати:

- для проведення статичного розрахунку болтового з'єднання на зминання ввели поправочну функцію, параметрами якої є характеристики структури ПКМ і коефіцієнт вигину;

- уточнений вид поправочної функції необхідно одержувати в додаткових дослідженнях (натурних або чисельних), що дозволить створити базу даних для величин цієї функції для актуальних у галузі варіантів силових болтових з'єднань із композитами.

Ключові слова: чисельне 3D моделювання; ПКМ; болтове з'єднання; міцність; МСЕ.

About calculations of bearing holes in a plate from a carbon fibre reinforced plastic a bolted joint

Konstantin Rudakov, Yury Dyfuchyn

Abstract. Purpose. In order to carry out calculations of net-tension failure of the weakened cross-section of bolted joints with CFRP, it is necessary to estimate the value of the generalized stress concentration factor at the hole.

Methodology. Used a method of finite-elements and the 3D contact model as much as possible approached to real geometry and conditions of load application. Earlier, the authors created 24 3D models of samples of single-shear two-row bolted joint with CFRP (contact task), in which the structures of CFRP (6 variants) varied, as well as the side gap of bolts with holes (4 values).

The magnitude of the contraction force of the packet and the force that stretched the sample were unchanged. Based on the results of calculations, stress distributions are determined in CFRP plates at the holes (tables, graphs) are calculated.

Findings. Based on these results and additional calculations, the following conclusions were reached:

- in static strength analysis of bolted joints on bearing have entered the correction function which parameters are characteristics of structure composite and bend factor;

- the specified kind of correction function is necessary for receiving in additional researches (natural or numerical), that will allow to create a database for sizes of this function for actual variants in branch power bolted joints with composites.

Originality. The possible algorithms for estimating the static tensile strength of bearing of bolted joints with CFRP are substantiated.

Keywords: numerical 3D-modelling; FEM; composite; a bolt joint; strength.

References

1. Стрижиус В.Е. Метод расчета на усталость срезных болтов в металло-композитных соединениях элементов авиаконструкций / В.Е. Стрижиус // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 199. – С.52–61. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2014-0-199-52-61>
2. Василевский Е.Т. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов / Е.Т. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2010. – № 47. – С. 42-52.
3. Двейрин А.З. Обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального обеспечения проектирования агрегатов самолета из полимерных композитов с механическими соединениями деталей / А.З. Двейрин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 66. – С. 5-19.
4. Киркач А.Б. Проблемы прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков / А.Б. Киркач // Вестник ХПИ. Серия "Динамика и прочность машин". – 2011. – №63. – С. 45-54.
5. Kelly, G. and Hallström, S. (2004), "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance", Composites. Part B: Engineering, no. 35, pp. 331-343.
6. Kelly, G. (2006), "Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints". Composite Structures, no. 72, pp. 119-129.
7. Ekh, Johan, Schön, Joakim and Melin, Gunnar (2005), "Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints", Composites. Part B: Engineering, no. 36, pp. 195-208.

8. Рудаков К.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NASTRAN /К.Н. Рудаков, С.Н. Шукаев // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", Серія Машинобудування. – 2013. - №67. – С. 199-206.
9. Rudakov K. Finite element analysis of the effect of technological factors on the strength of composite bolted joints / K. Rudakov, S. Shukaev, G. Krivov, V. Matvienko // Mechanotronic Systems and Materials 2014. Selected Papers. Opole University of Technology. – 2015. - pp.103-108.
10. Дифучин Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 1. Створення змішаних 3D-моделей / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. -2016.- Том 77, №2. С. 100-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.76975>
11. Кучер Н.К. Деформирование и прочность слоистых углепластиков при статическом термомеханическом нагружении / Н.К. Кучер, М.Н. Заразовский, Е.Л. Данильчук // Механика композитных материалов. - 2012. – Том. 48, № 6. –С. 963-980.
12. ГОСТ 25602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М.: Из-во стандартов, 1980. – 17 с.
13. Дифучин Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 2. Вплив зазорів і структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану болтів / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. - 2016. Том 78, №3. – С. 132-145. DOI: <https://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.87475>
14. Рудаков К.М. Вплив структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану в околі отворів болтових з'єднань з ПКМ / К.М. Рудаков, Ю.М. Дифучин // Технологические системы. - 2016. – Том 77, №4. – С. 28-40.
15. Dyfuchyn, Y. and Rudakov, K. (2017), "Numerical Modelling of Bolted Composite Joints. Bolts Rigidity Effect on Normal Stresses in the Composite Layers", Mechanics and Advanced Technologies, no. 1(79), pp. 19-25. DOI: <https://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95756>
16. Дифучин Ю.М. Анализ разрывных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в зонах отверстий в пластинах с ПКМ образца болтового соединения / Ю.Н. Дифучин, К.Н. Рудаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". -2017. Том 91, №3. – С. 47-60.
17. Рудаков К.М. Про вплив величини зазору між болтом та отвором на напружений стан болта однозрізного болтового з'єднання в зоні "зрізу" / К.М. Рудаков, О.А. Добронравов // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування. - 2013. – Том 69, №3. – С. 62–71.
18. Болотин В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
19. Рудаков К.М. Чисельне обґрунтування застосування змішаних 3D-моделей ПКМ при розрахунках болтових з'єднань / К.М. Рудаков, А.С. Шандура // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. - 2015. – Том74, №2. – С. 67–76.